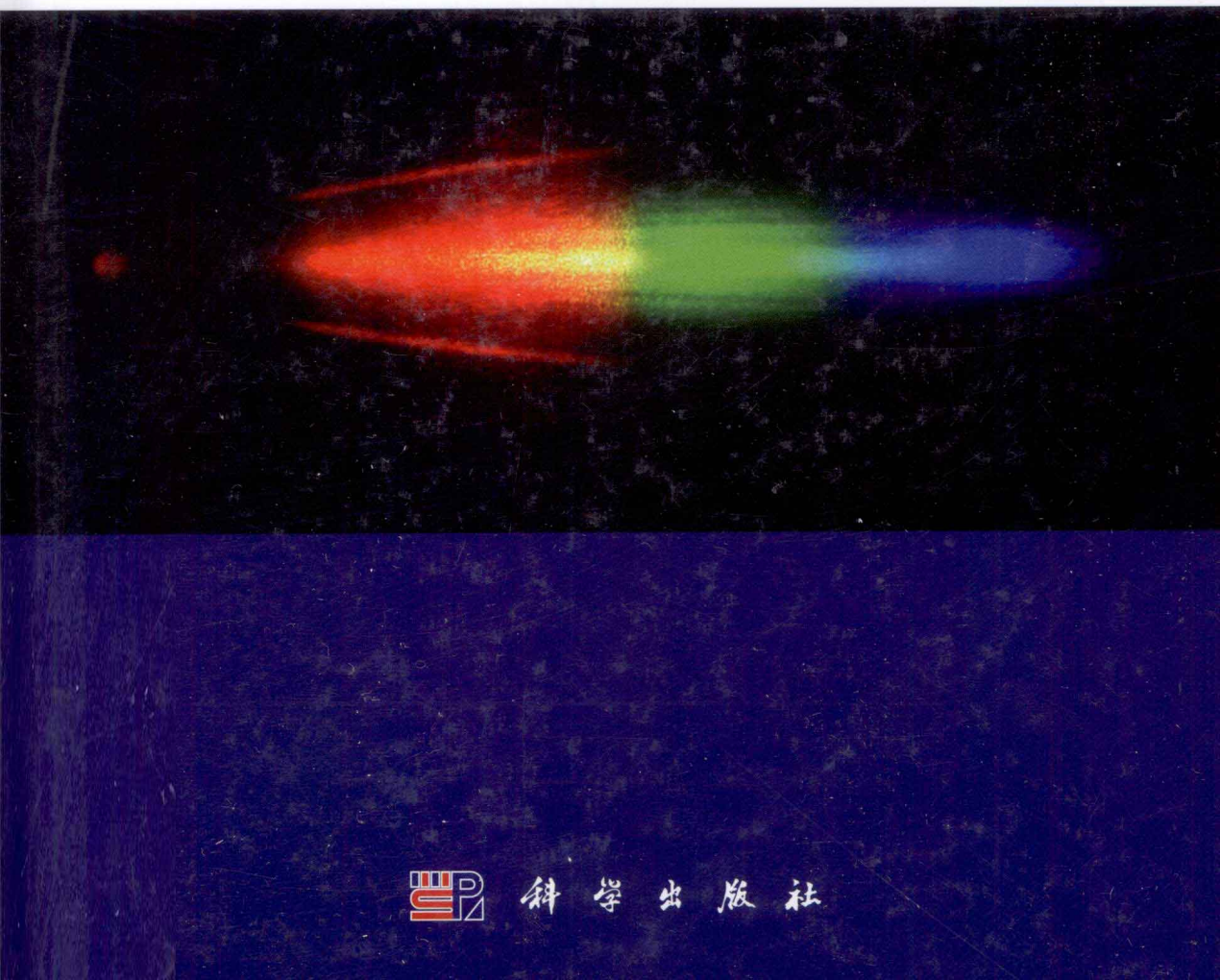


“十二五”国家重点图书出版规划项目

光学与光子学丛书

强光光学

〔美〕赫光生 刘颂豪 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

光学与光子学丛书

强 光 光 学

(美) 赫光生 刘颂豪 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书作者为国际知名学者, 长期在非线性光学领域从事基础与前沿性研究. 本书主要描述强相干光辐射与物质相互作用过程中的各种非线性光学效应, 包括它们产生的物理原理、实验技术、新近研究成果, 以及在现代科学技术发展中的独特应用. 主要内容有: 二阶和三阶非线性混频效应, 强光引起的感应折射率变化、自聚焦、自散焦、相位自调制和光谱自加宽效应, 强光受激散射效应, 非线性光谱学效应, 光学相位共轭效应, 瞬态相干光学效应, 多光子吸收和激发效应, 以及时间和空间光学孤子效应和应用等. 本书具有概念描述清楚、公式推导简洁、理论与实验并重, 以及图文并茂等特点.

本书可作为物理、光学、光电子学、信息与通信工程等专业之高年级本科生或研究生“非线性光学”课程的教学参考书, 也可作为相关课题领域内科技工作者的专业参考书.

图书在版编目(CIP)数据

强光光学/(美)赫光生, 刘颂豪著. —北京: 科学出版社, 2011
(光学与光子学丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-031226-6

I. ①强… II. ①赫… ②刘… III. ①非线性光学—研究 IV. ①O437

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011) 第 099716 号

责任编辑: 刘凤娟 / 责任校对: 朱光兰

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 6 月第 一 版 开本: B5(720 × 1000)

2011 年 6 月第一次印刷 印张: 28 1/2 插页: 4

印数: 1—2 000 字数: 556 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

丛 书 序

长期以来,我一直想组织同行出一套适合于光学、光学工程工作者和研究人员需求的光学与光子学的丛书.如今,在科学出版社同志们的努力推进和工作在光学和光子学科研、教学一线的广大专家们的大力支持下,这样一个愿望终于得以实现,这使我感到由衷的欣慰和喜悦,我深信这样一套丛书的出版必将有效地促进我国光学、光电子以及光学工程技术的创新发展.

当今世界科学技术发展日新月异.科技创新能力已成为一个地区、一个国家,尤其是一个大国经济和社会发展的核心竞争力.在众多纷繁的科技领域中,光学与光子学的发展直接影响到其他诸多学科领域的发展及其可能取得的成就.不但物理学、化学、生命科学、天文学等基础科学的发展离不开光学与光子学,对现代人类社会和人类生活影响甚大的一些技术科学如照明、通信、洁净能源、遥感、显示、环境监测、国防和空间开发、医疗与诊断、先进制造等都需要光学与光子学的知识.光学与光子学是渗透到各个学科领域内的前沿科学,光学与光子学涉及到几乎所有技术前沿的核心技术.中华民族要真正走向繁荣昌盛离不开对光的驾驭.

编委会把丛书的名称定为《光学与光子学丛书》,是想以此既包含经典光学(classical optics)的精华,也容纳现代光学(modern optics)即光子学(photonics)的最新研究进展.我和所有编委们一同期待着这套丛书能够在涉及光科学和光学技术知识的深度和广度上都达到一个崭新的高度.积跬步至千里,汇小溪成江河.改革开放三十年的成就使得我国的光学事业处在了一个新的起点上.让我们大家共同努力,以此套高质量、高水准的《光学与光子学丛书》作为对中国光学事业大发展的鼎力贡献.

母国光

2011年1月

前 言

“强光光学”或通常所称的“非线性光学”是一门随着激光技术的出现而发展起来的新兴学科。它着重研究激光技术出现后,人们通过强相干光与物质间相互作用而陆续发现的一系列前所未有的光学现象和效应,包括它们的实验表现、物理解释、理论描述以及技术应用。

1961年第一个非线性光学效应——光学二次谐波的被发现,标志着这一新兴学科的诞生。至今这一学科已经历了相当长的发展历程。可以毫不夸张地说,到目前为止,人们对这一学科领域内有关光与物质相互作用规律的理解和知识,已经远远超过了激光技术出现前几百年所积累的相关知识的总和。当今激光技术应用领域的诸多方面,如光学相干变频、超短光脉冲技术、超高分辨光谱术、高速率长距离光纤通信、光信息存储与处理等,均在不同程度上利用了非线性光学的一些基本原理。

本书的两位作者以前曾出版过《强光光学及其应用》(刘颂豪与赫光生著,广东科技出版社,1995),以及*Physics of Nonlinear Optics* (G. S. He & S. H. Liu, World Scientific, 2000)。这两本书着重介绍了各种非线性光学效应的基本物理原理、实验现象特征,以及它们的独特技术应用等。本书则是作者在整合与精炼上述两本书的基础上,着重补充和加强了有关近些年来的新发展和新成就的介绍,其中也包括了作者及其合作者们多年来在非线性光学这一学科领域的某些重要专题方面(强光受激散射、光学相位共轭、多光子过程与应用等)所做出的一些成果和贡献。

从作者本身的写作意愿来说,力求能做到体系完整、立论严谨、理论与实验并重,以及图文并茂。至于本书出版后是否能够达到上述要求,则需要经过读者和时间的检验。本书采用国际单位制(SI)。

作者感谢中国科学院科学出版基金对本书出版的资助。此外,在本书的成书和定稿过程中,承蒙崔一平教授、王慧田教授、郑庆东研究员、沈宇震研究员、吕昌贵副教授、朱菁博士、蔡红星副教授、郭邦红博士等给予的支持和帮助,作者谨向他们表示诚挚的谢意。最后,作者感谢王飞龙先生对本书初稿成型和刘凤娟女士对本书最后定稿所做出的贡献。

赫光生 (G. S. He)

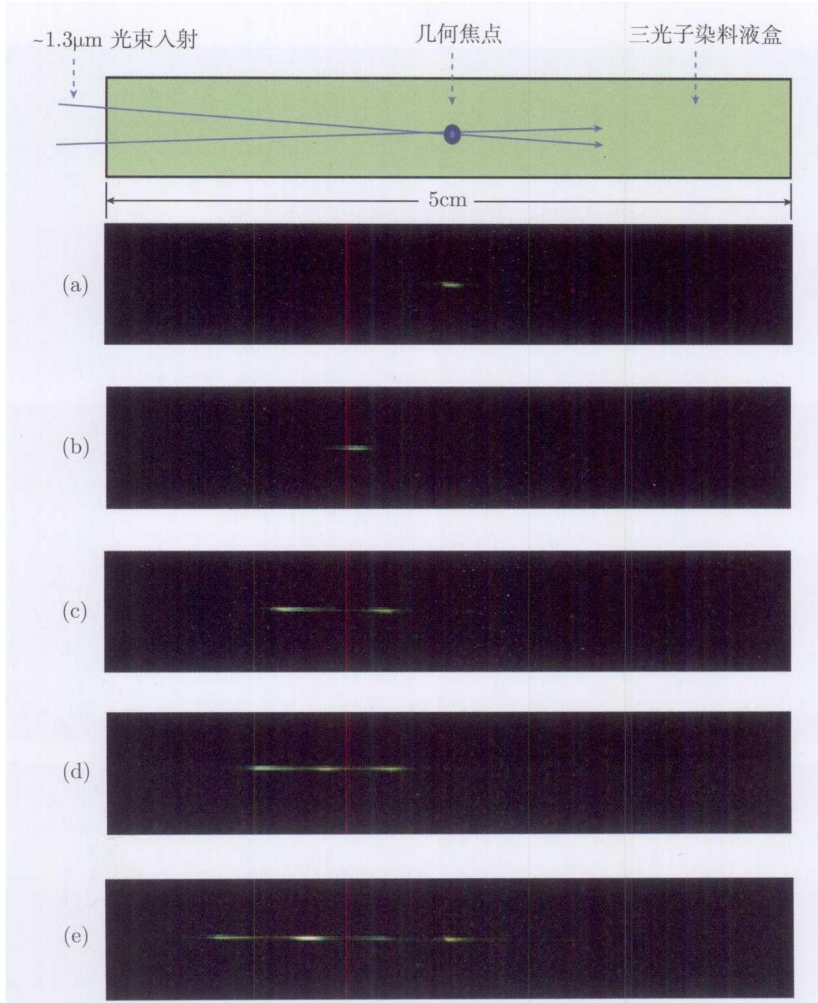
纽约州立大学布法罗分校

刘颂豪 (S. H. Liu)

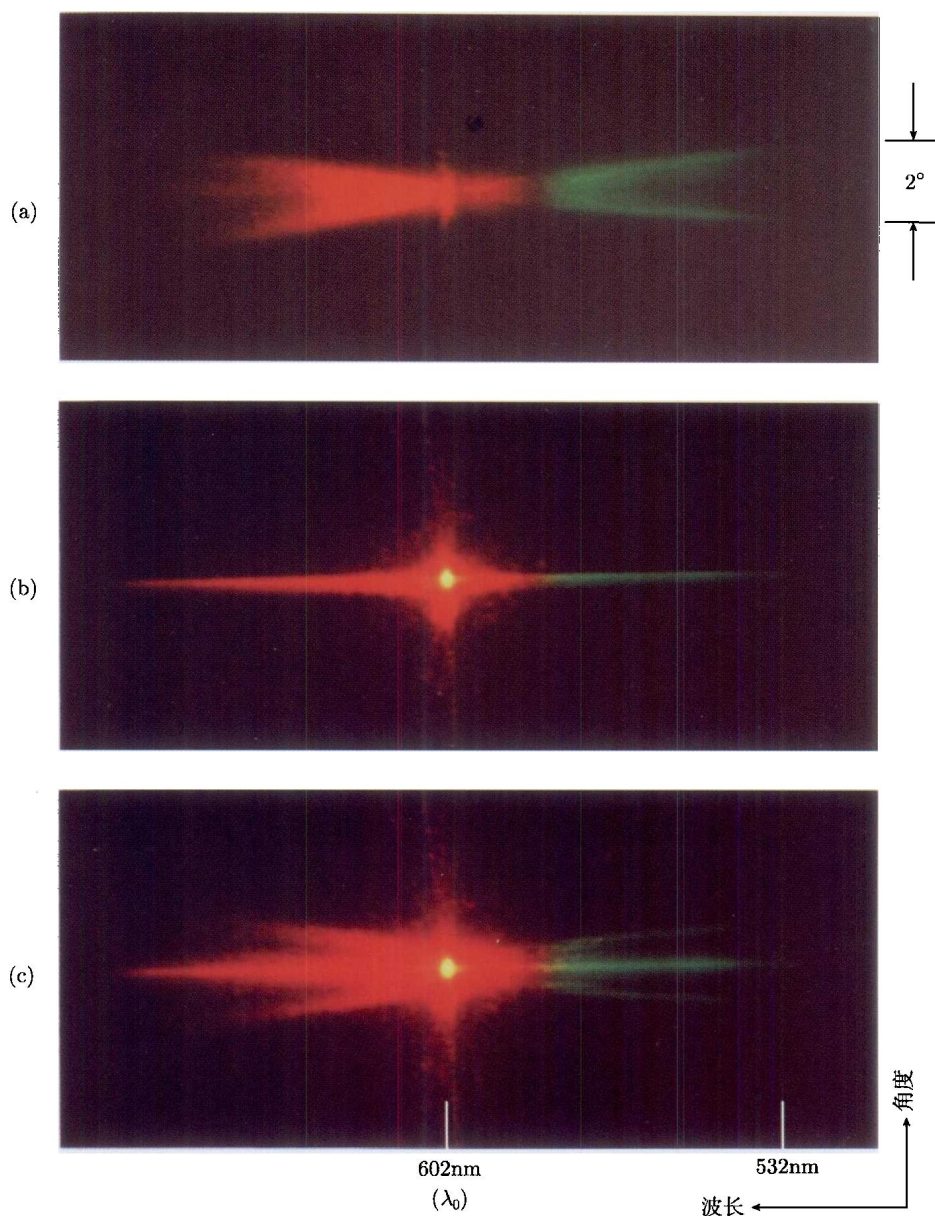
华南师范大学

2011年1月

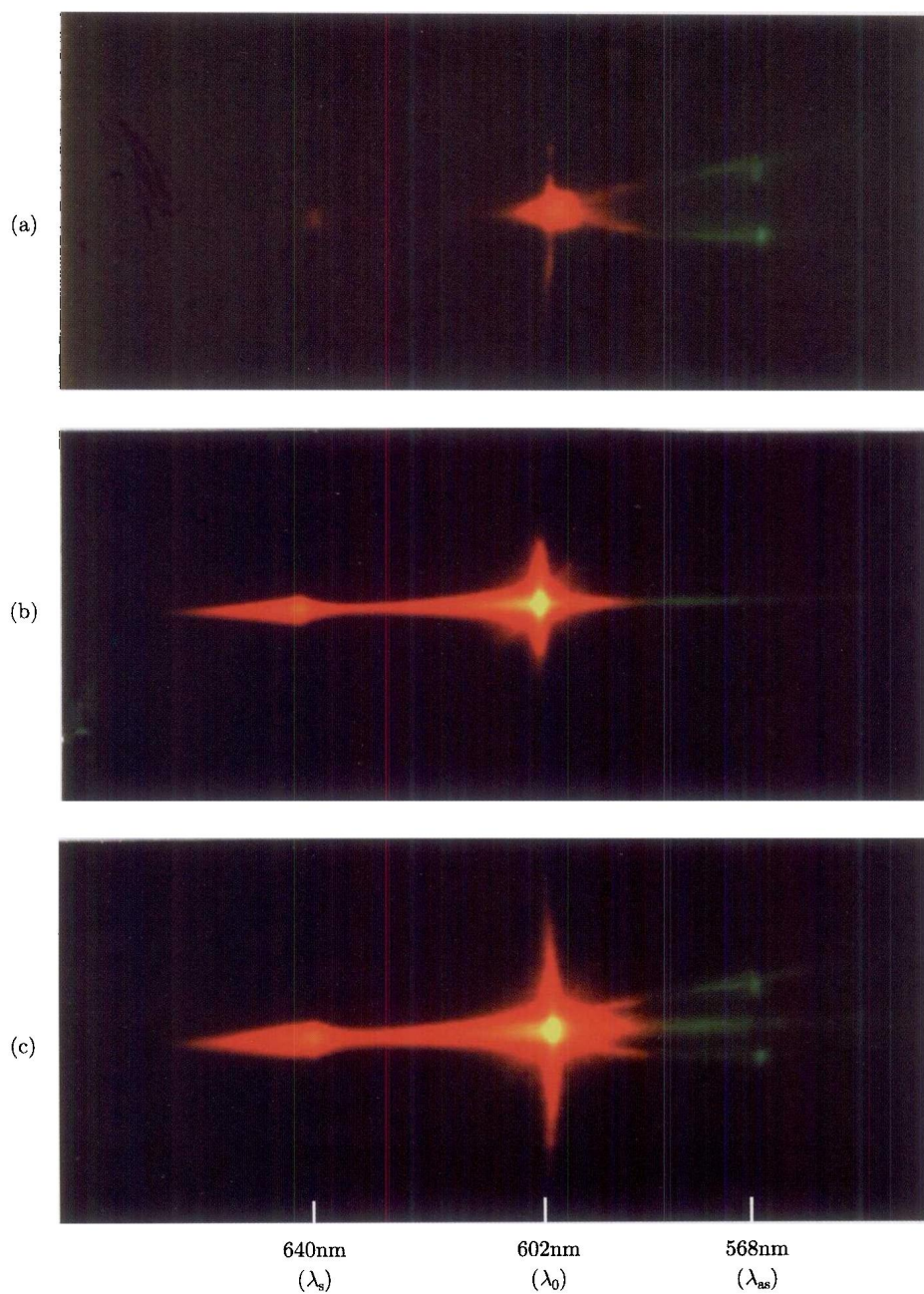
彩 图



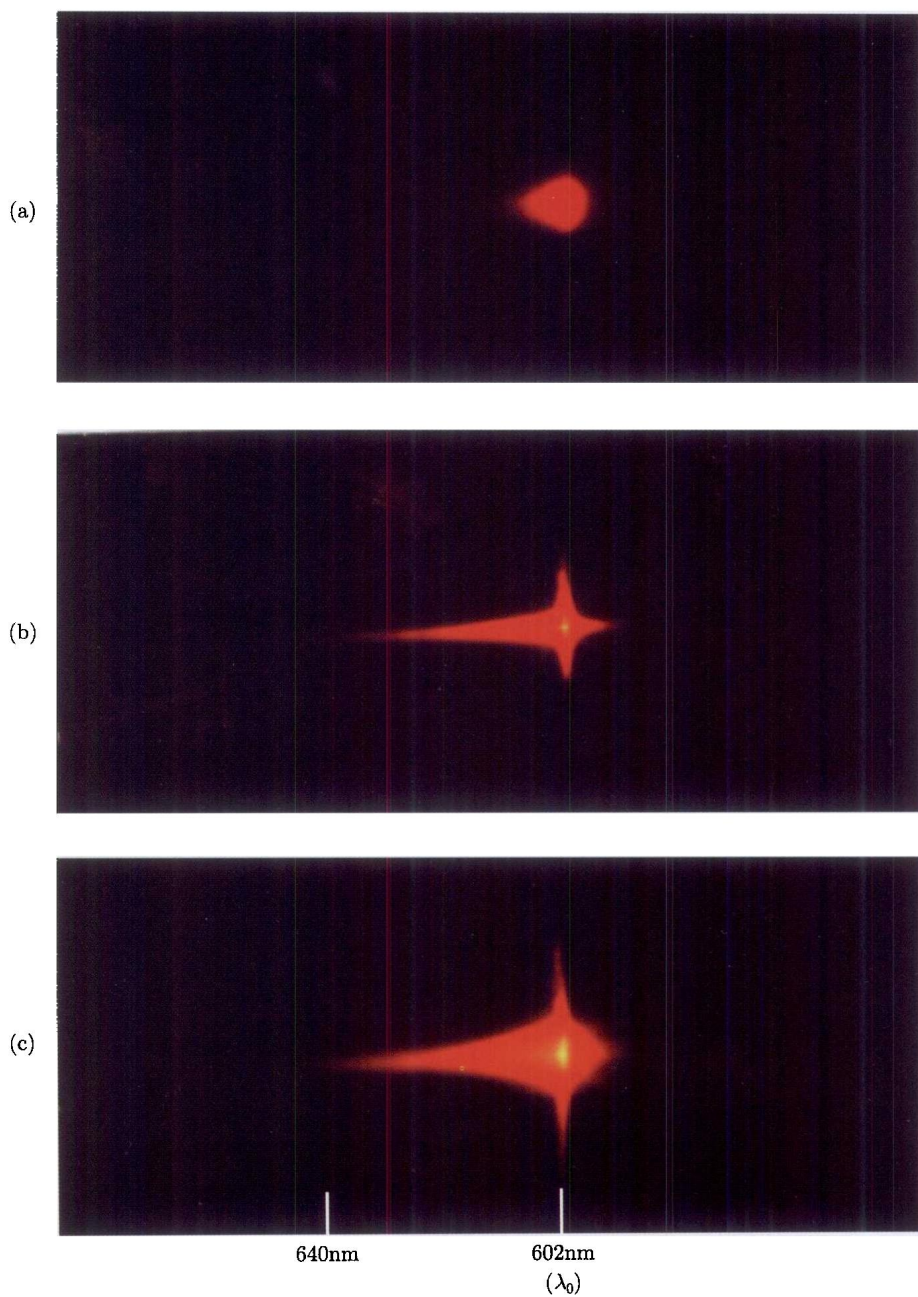
彩图 1 由自聚焦效应引起的几何焦点之前移、分裂, 以及多焦点结构的形成. 红外入射脉冲激光波长为 $\sim 1.3 \mu\text{m}$, 时宽为 $\sim 160 \text{fs}$, 经 $f = 15 \text{cm}$ 透镜聚焦在 5cm 长液盒中间; 液盒中充有具三光子激发荧光发射能力的染料溶液, 可见荧光波长为 $\sim 540 \text{nm}$. 入射脉冲能量: (a) $1.7 \mu\text{J}$; (b) $2.9 \mu\text{J}$; (c) $3.9 \mu\text{J}$; (d) $5.8 \mu\text{J}$; (e) $7.7 \mu\text{J}$ (参见正文 6.2.1 节说明).



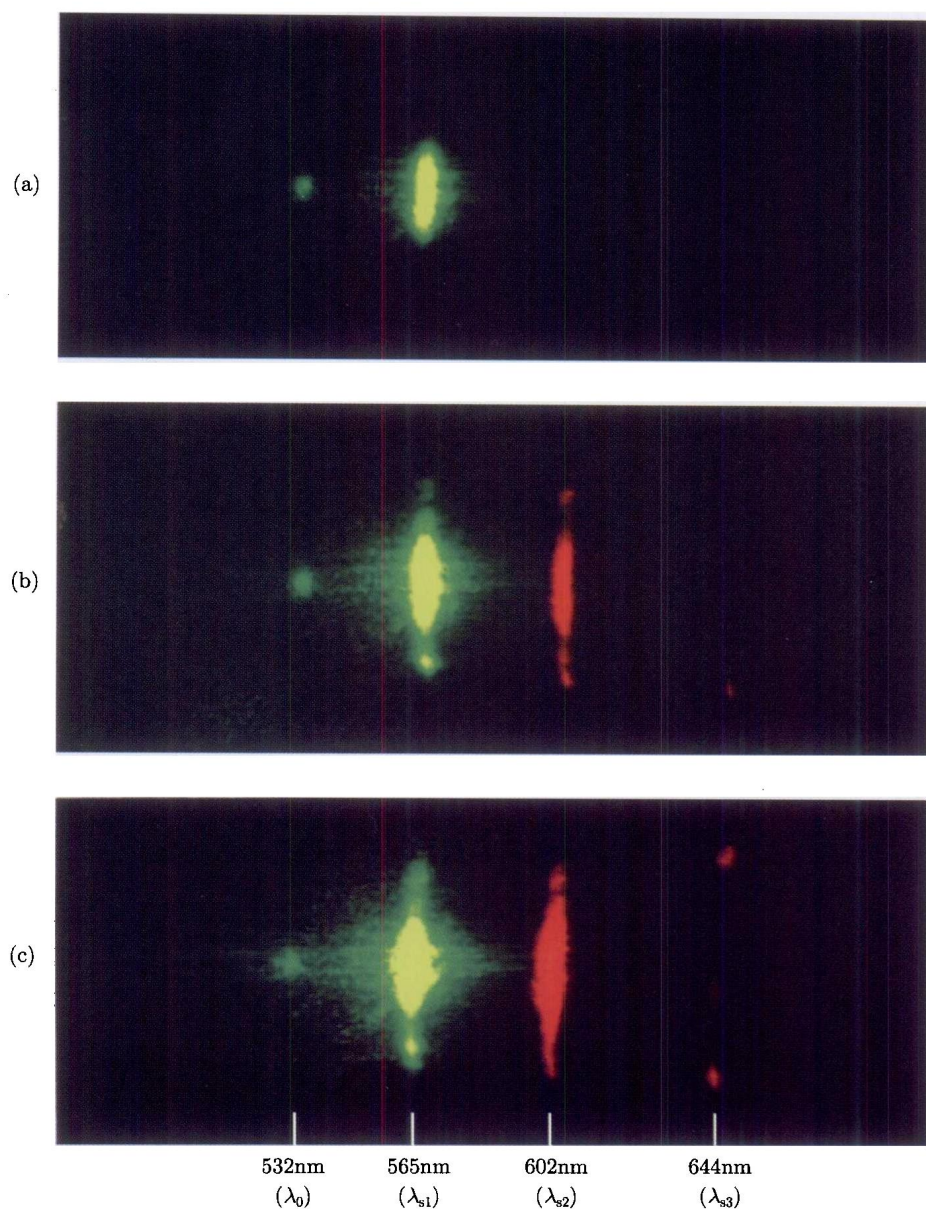
彩图 3 在波长为 $\sim 602\text{nm}$ 、时宽为 $\sim 0.5\text{ps}$ 的超短脉冲激光聚焦作用下, 通过 10cm 长充重水 (D_2O) 液盒, 产生轴向与非轴向相干辐射输出的光谱分光照片: (a) 单独记录非轴向辐射波长对角度的依赖关系; (b) 单独记录轴向辐射波长与角度无关; (c) 同时记录轴向与非轴向相干辐射光谱结构. 输入脉冲光强为 $\sim 10\text{GW}/\text{cm}^2$ (参见正文 6.5.1 节说明).



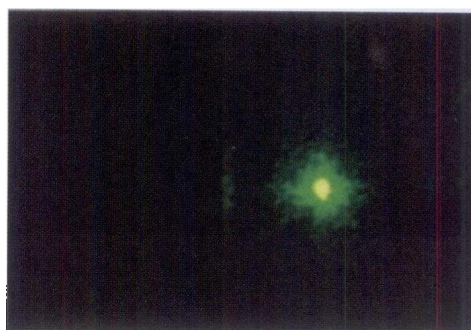
彩图 4 样品为 10cm 长充苯 (C_6H_6) 液盒, 其余同彩图 3. λ_0 为入射光波长, λ_s 和 λ_{as} 分别为苯的 992cm^{-1} 频移之斯托克斯与反斯托克斯拉曼散射波长 (参见正文 6.5.1 节说明).



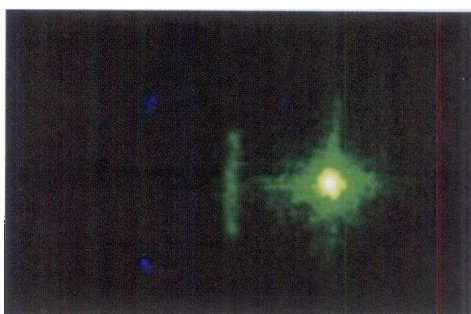
彩图 5 样品为 10cm 长充二硫化碳 (CS_2) 液盒, 其余同彩图 3 (参见正文 6.5.1 节说明).



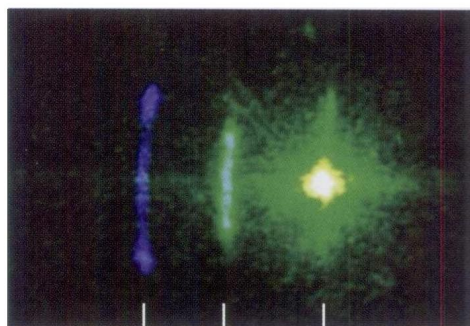
彩图 6 在波长为 532nm、时宽为 $\sim 8\text{ns}$ 的脉冲激光作用下, 由 1cm 长方解石晶体产生的轴向受激拉曼散射 (SRS) 和非轴向拉曼增强四波混频 (FWM) 输出光谱的空间结构 (斯托克斯一侧). 入射泵浦光强: (a) $550\text{MW}/\text{cm}^2$; (b) $900\text{MW}/\text{cm}^2$; (c) $1.4\text{GW}/\text{cm}^2$. λ_0 为泵浦光波长, λ_{si} 为第 i 级斯托克斯拉曼频移波长 (参见正文 7.3.2 节说明).



(a)



(b)

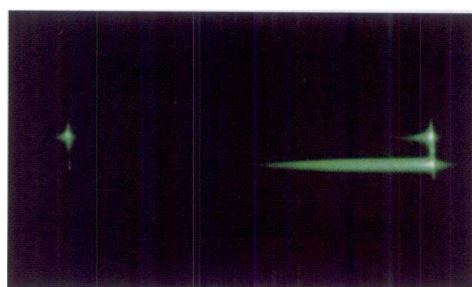


(c) 477nm 503nm 532nm
(λ_{as2}) (λ_{as1}) (λ_0)

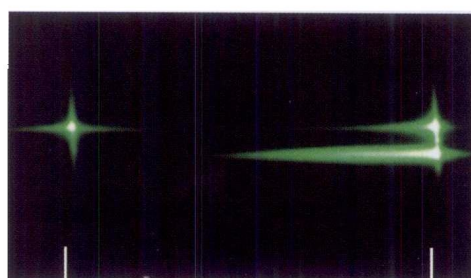
彩图7 由1cm长方解石晶体产生的轴向SRS和非轴向拉曼增强FWM输出光谱的空间结构(反斯托克斯一侧), 其余同彩图6. λ_{asi} 为第 i 级反斯托克斯拉曼频移波长(参见正文7.3.2节说明).



(a)



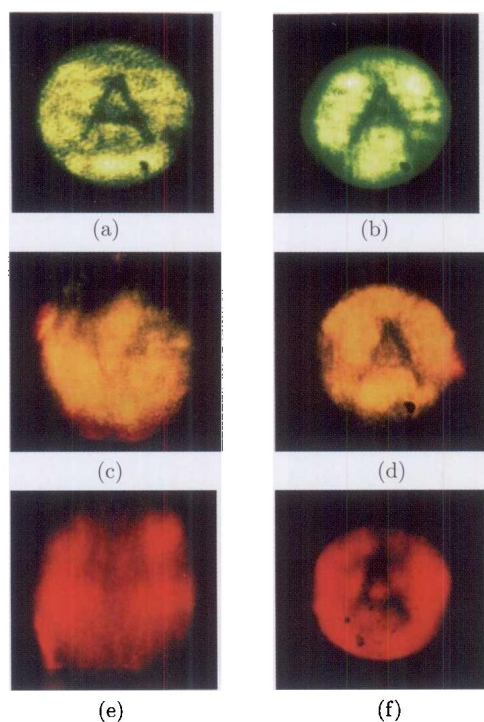
(b)



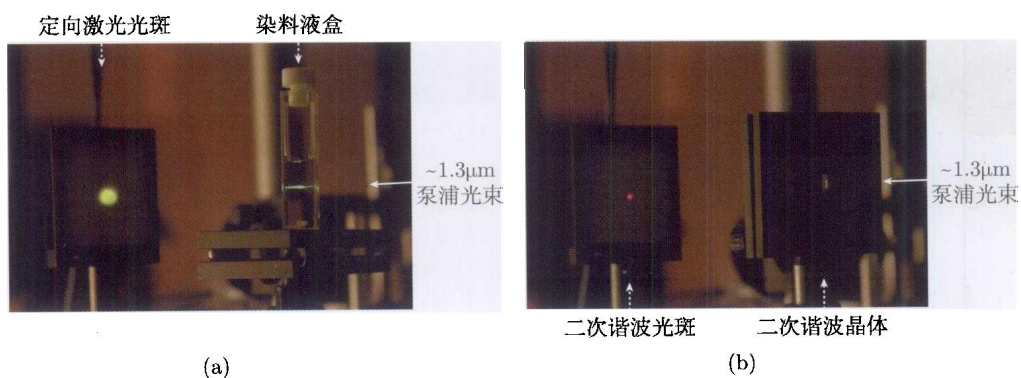
(c) 551nm 532nm
(λ_s) (λ_0)

彩图8 在波长为532nm、时宽为~10ns、谱宽为~1cm⁻¹的脉冲激光作用下,由10cm长充CS₂液盒产生的前向(上列)和后向(下列)受激散射光谱照片. 入射泵浦光强:

- (a) 170MW/cm²; (b) 250MW/cm²;
- (c) 400MW/cm². λ_0 为泵浦光波长, λ_s 为斯托克斯受激拉曼散射波长(参见正文7.6.7节说明).



彩图 9 表明只有后向受激散射和激光发射具有相位共轭特性的近场图照片：(a) 入射 532nm (或 1064nm) 泵浦光束，携带“A”字形信息；(b) 出自充丙酮玻璃瓶之后向受激布里渊散射光束；(c)、(d) 出自充苯玻璃瓶之前、后向受激拉曼散射光束；(e)、(f) 出自充双光子泵浦染料溶液玻璃瓶之前、后向激光发射光束 (参见正文 8.6.2 节说明)。



彩图 10 (a) 在染料溶液内通过三光子泵浦产生频率上转换激光发射的实验照片；(b) 波长为 $\sim 1.3\mu\text{m}$ 脉冲激光通过晶体产生二次谐波的实验照片。两幅照片显示出两种不同种类的相干辐射均具有高定向性 (参见正文 13.4.1 节说明)。

目 录

前言

第 1 章 强光光学导论	1
1.1 强光光学的学科定义	1
1.2 强激光与物质相互作用的主要特点	3
1.3 强光光学效应的应用价值和科学意义	6
1.4 描述强光光学效应的两种理论体系	8
第 2 章 非线性电极化过程的基础知识	10
2.1 光学介质的非线性感应电极化效应	10
2.2 介质产生感应电极化的物理机制	13
2.3 非线性电极化率的张量表现形式	14
2.4 非线性电极化率的基本性质	16
2.5 非线性电极化作用下的耦合波动方程	19
参考文献	22
第 3 章 二阶非线性 (三波) 混频效应	24
3.1 光学二次谐波效应	24
3.1.1 二次谐波产生的量子图像描述	24
3.1.2 二次谐波的半经典理论定量描述	25
3.1.3 产生二次谐波的工作物质	29
3.1.4 产生二次谐波的实验装置	32
3.2 光学和频与差频效应	34
3.2.1 光学和频效应	34
3.2.2 光学差频效应	35
3.2.3 光学和频与差频产生的实验装置	36
3.3 光学参量放大与振荡效应	37
3.3.1 光学参量效应的物理描述	37
3.3.2 光学参量放大和振荡条件的推导	38
3.3.3 光学参量放大器和振荡器实验系统	40
参考文献	44
第 4 章 三阶非线性 (四波) 混频效应	46
4.1 四波混频 (四光子参量作用) 的几种方式	46

4.2 光学三次谐波的产生	48
4.2.1 三次谐波效应的非线性电极化理论描述	48
4.2.2 实现三次谐波相位匹配的方法	51
4.2.3 三次谐波产生的共振增强	52
4.2.4 产生三次谐波及和频辐射的介质和装置	54
4.3 拉曼共振增强的四波混频	56
4.3.1 相干斯托克斯与反斯托克斯环状辐射的产生	56
4.3.2 两拉曼差频光束成微小角度入射的情况	58
4.4 非共振四光子参量作用	59
4.4.1 部分简并四光子参量作用	59
4.4.2 简并四光子参量作用	61
参考文献	62
第 5 章 强光引起的折射率变化	65
5.1 线性光学中对折射率的描述	65
5.2 非线性光学中对折射率的描述	67
5.3 双光束入射引起的折射率变化	69
5.4 双光子共振引起的折射率增强变化	70
5.5 拉曼共振引起的折射率增强变化	72
5.6 折射率感应变化的物理机制	73
5.6.1 引起折射率变化的不同物理机制	73
5.6.2 分子再取向克尔效应引起折射率变化的表示式	75
5.6.3 电致伸缩效应导致的折射率变化的表示式	77
5.6.4 感应折射率变化的时间特性	78
5.7 二阶非线性电极化过程导致的折射率耦合变化(光频泡克耳斯效应)	80
参考文献	84
第 6 章 强光自聚焦、自相位调制与光谱自加宽	85
6.1 强光自聚焦的基本理论描述	85
6.1.1 自聚焦现象概述	85
6.1.2 光束自陷的感应波导模型	88
6.1.3 稳态自聚焦解析理论	89
6.1.4 稳态自聚焦焦距的半经验公式	94
6.1.5 动态自聚焦描述	94
6.2 自聚焦的直接观测实验	95
6.2.1 自聚焦光束多焦点结构的直接观测	95
6.2.2 对超短脉冲产生多焦点自聚焦行为的模拟数值计算	100

6.3 强光脉冲的自相位调制和频率啁啾效应	103
6.4 强光脉冲的光谱自加宽效应	107
6.4.1 准单色强光脉冲自调制导致的光谱自加宽	107
6.4.2 多频率组分脉冲拍频调制导致的光谱自加宽	108
6.5 相干连续谱白光辐射之产生	111
6.5.1 超短强光脉冲产生相干连续谱白光辐射	111
6.5.2 用纳秒激光脉冲产生相干连续谱白光辐射	116
6.5.3 相干连续谱白光辐射之应用	119
参考文献	120
第 7 章 强光受激散射效应	122
7.1 光的散射现象概述	122
7.1.1 光的散射现象的起因	122
7.1.2 光的散射现象的分类	123
7.1.3 光的受激散射与普通 (自发) 散射间的区别	125
7.2 受激拉曼散射理论	126
7.2.1 拉曼散射过程的量子理论图像	126
7.2.2 拉曼散射过程的量子理论描述	128
7.2.3 自发和受激拉曼散射概率表示式	131
7.2.4 受激拉曼散射增益系数和阈值条件	133
7.3 受激拉曼散射实验规律性	136
7.3.1 实验装置和散射介质	136
7.3.2 受激拉曼散射过程中的四波混频	138
7.3.3 拉曼共振增强的自聚焦效应	143
7.4 自旋反转、电子、纯转动跃迁受激拉曼散射	147
7.4.1 自旋反转受激拉曼散射	147
7.4.2 电子跃迁受激拉曼散射	150
7.4.3 纯转动跃迁受激拉曼散射	153
7.5 受激布里渊散射效应	154
7.5.1 自发和受激布里渊散射的物理图像	154
7.5.2 受激布里渊散射的理论	156
7.5.3 受激布里渊散射 (SBS) 的实验研究	163
7.6 受激克尔散射效应	168
7.6.1 有关光频克尔效应的背景知识	168
7.6.2 受激瑞利翼散射	169
7.6.3 超宽带受激散射现象的发现	170

7.6.4 克尔散射的物理模型	172
7.6.5 克尔散射的截面	174
7.6.6 受激克尔散射的增益和阈值条件	177
7.6.7 实验结果与理论比较	179
7.7 受激瑞利-布拉格散射效应	184
7.7.1 效应发现的背景	184
7.7.2 受激瑞利-布拉格散射的物理模型	184
7.7.3 受激瑞利-布拉格散射产生的阈值条件	185
7.7.4 受激瑞利-布拉格散射的实验特性	187
7.8 受激米氏散射效应	189
参考文献	192
第 8 章 光学相位共轭效应	197
8.1 相位共轭波的定义和功用	197
8.1.1 频率简并与非简并的相位共轭波场	197
8.1.2 相位共轭波的特殊功用	198
8.2 利用四波混频产生后向相位共轭波	200
8.2.1 利用简并四波混频产生后向共轭波	200
8.2.2 简并四波混频产生后向共轭波的两种物理解释	203
8.2.3 利用部分简并四波混频产生后向共轭波	205
8.3 利用四波和三波混频产生前向相位共轭波	206
8.3.1 利用四波混频产生前向共轭波	206
8.3.2 利用三波混频产生前向共轭波	208
8.4 利用四波混频产生相位共轭波实验研究	210
8.4.1 简并四波混频产生后向共轭波	210
8.4.2 部分简并四波混频产生后向共轭波	214
8.5 利用后向受激散射产生相位共轭波	215
8.5.1 后向受激散射相位共轭特性的实验发现	215
8.5.2 后向受激散射相位共轭特性的实验表征	216
8.5.3 后向受激散射具有相位共轭特性的物理解释	220
8.5.4 后向受激散射相位共轭特性的数学描述	221
8.6 利用后向激光发射产生相位共轭波	225
8.6.1 后向激光发射相位共轭特性的发现和物理解释	225
8.6.2 后向激光发射相位共轭特性的实验特征	226
8.7 光学相位共轭技术的应用	231
8.7.1 相位共轭技术在特种激光器系统中的应用	231

8.7.2 相位共轭技术在高比特速率远距离光纤通信系统中的应用	232
参考文献	238
第 9 章 非线性光谱学效应	240
9.1 限制光谱分辨率之诸因素	240
9.1.1 传统光谱分光仪器的仪器宽度	241
9.1.2 气体样品的谱线多普勒加宽	241
9.1.3 气体样品的谱线压力 (碰撞) 加宽	242
9.1.4 渡越加宽影响	243
9.1.5 谱线的二次 (横向) 多普勒效应加宽	243
9.1.6 反冲加宽和光场斯塔克加宽	244
9.1.7 入射激光谱线宽度之影响	245
9.2 饱和吸收光谱学效应	245
9.2.1 效应概述	245
9.2.2 基本理论考虑	248
9.2.3 实验研究简述	250
9.2.4 交叉耦合饱和吸收光谱效应	253
9.3 双光子吸收光谱学效应	255
9.3.1 效应概述	255
9.3.2 有关 2PA 的基本理论描述	257
9.3.3 有关实验结果	259
9.4 相干拉曼和四波混频光谱学效应	262
9.4.1 效应概述	262
9.4.2 相干反斯托克斯拉曼光谱学 (CARS) 效应	263
9.4.3 拉曼感应克尔效应光谱学 (RIKES) 效应	268
9.4.4 拉曼增益光谱学 (RGS) 和反拉曼光谱学 (IRS) 效应	270
9.5 激光偏振光谱学效应	273
9.5.1 效应概述	273
9.5.2 消多普勒加宽饱和吸收偏振光谱学效应	273
9.5.3 偏振 CARS 光谱学效应	276
9.5.4 偏振标定分子光谱学效应	278
参考文献	280
第 10 章 瞬态相干光学效应	282
10.1 瞬态相干作用的定义和特点	282
10.2 自感透明效应	283
10.2.1 2π 脉冲的定义和自感透明	283